Curso a distancia para “La generación y el uso eficiente del vapor”

año 2007

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

En este CURSO A DISTANCIA para el “ La generación y el uso eficiente del vapor ”, trataremos de indicar aquellos caminos más simples y prácticos, que nos permitan lograr que una instalación sea sencilla, segura y **EFICIENTE**, basados en nuestra experiencia práctica.

Debemos diferenciar si lo que tenemos es que “mejorar” un sistema existente o tenemos que hacer un cambio “radical” en el concepto de la generación del vapor (como puede ser la alternativa hoy tan válida la co-generación): **Caldera-turbina con generación eléctrica y vapor de escape o drenaje para procesos; Turbina a gas con calderas de recuperación de vapor para procesos o Motores Diesel con calderas de vapor de recuperación para procesos**. Cada uno de estos sistemas se se adapta a diferentes necesidades de la relación de producción de electricidad/vapor, además puede contemplar una serie de combustibles de acuerdo a la región.

Pero definamos, primero el concepto de Eficiencia.

Según el diccionario, ENCICLOPEDIA UNIVERSAL SOPENA, de la lengua española, se define como **EFICIENCIA : virtud, poder, facultad para hacer algo, y acción con que se muestra.** Pero cuando nos referimos a las cuestiones de las **calderas** o a la **física**, la **EFICIENCIA es el RENDIMIENTO**.

Definiendo como **RENDIMIENTO térmico de un motor a : Relación** entre el **trabajo mecánico efectuado por un motor térmico** y el **equivalente mecánico de la totalidad del calor recibido**.

En nuestro caso, será la relación del calor realmente aprovechado o trasladado en cada fase del proceso en relación al calor suministrado por el combustible (referidas al Poder Calorífico Superior o Inferior, de lo contrario no podremos interpretar el valor en forma adecuada).

Traducida la EFICIENCIA en términos reales: **es la de apreciar los costos operativos en la utilización de los combustibles y su posible mejor aprovechamiento.**

Para **comparar EFICIENCIAS**, debemos de **hacerlo al medirla en condiciones operativas similares**, salvo aquellos parámetros en que estamos buscando una alternativa de mejora. Por ejemplo: si comparamos dos calderas diferentes, debemos de hacerlo en consideración a iguales presiones de vapor y % de carga o producción de vapor, temperatura del agua de alimentación, % de purgas, etc.

Y cuando vamos a **comparar mejoras de EFICIENCIAS**, buscando la expresión **% de ahorro o mejora**, el cálculo no será una mera diferencia de las EFICIENCIAS, porque si fuera así, estamos comparando erróneamente (dado que estamos estableciendo el ahorro sobre una base del 100%). Por ejemplo: si en una caldera la EFICIENCIA TOTAL medida con un determinado exceso de aire dá 80% al P.C.I. y al bajar el exceso de aire dicha EFICIENCIA al medirla nos dá 85% al P.C.I., el ahorro posible **no es la diferencia de 85%-80%= 5% , sino que el verdadero ahorro será mayor dado que es referido al 85% y no al 100%, o ser (85%-80%)/85%= 5,9%,** un valor evidentemente mayor.

POSIBLE AHORRO AL MEJORAR CONDICIONES DE COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA

Eficiencias mejoradas:	**80%**	**82%**	**84%**	**86%**	**88%**	**90%**	**92%**
Eficiencias a mejorar:							
60%	25,0%	26,8%	28,6%	30,2%	31,8%	33,3%	34,8%
62%	22,5%	24,4%	26,2%	27,9%	29,5%	31,1%	32,6%
64%	20,0%	22,0%	23,8%	25,6%	27,3%	28,9%	30,4%
66%	17,5%	19,5%	21,4%	23,3%	25,0%	26,7%	28,3%
68%	15,0%	17,1%	19,0%	20,9%	22,7%	24,4%	26,1%
70%	12,5%	14,6%	16,7%	18,6%	20,5%	22,2%	23,9%
72%	10,0%	12,2%	14,3%	16,3%	18,2%	20,0%	21,7%
74%	7,5%	9,8%	11,9%	14,0%	15,9%	17,8%	19,6%
76%	5,0%	7,3%	9,5%	11,6%	13,6%	15,6%	17,4%
78%	2,5%	4,9%	7,1%	9,3%	11,4%	13,3%	15,2%
80%	0,0%	2,4%	4,8%	7,0%	9,1%	11,1%	13,0%

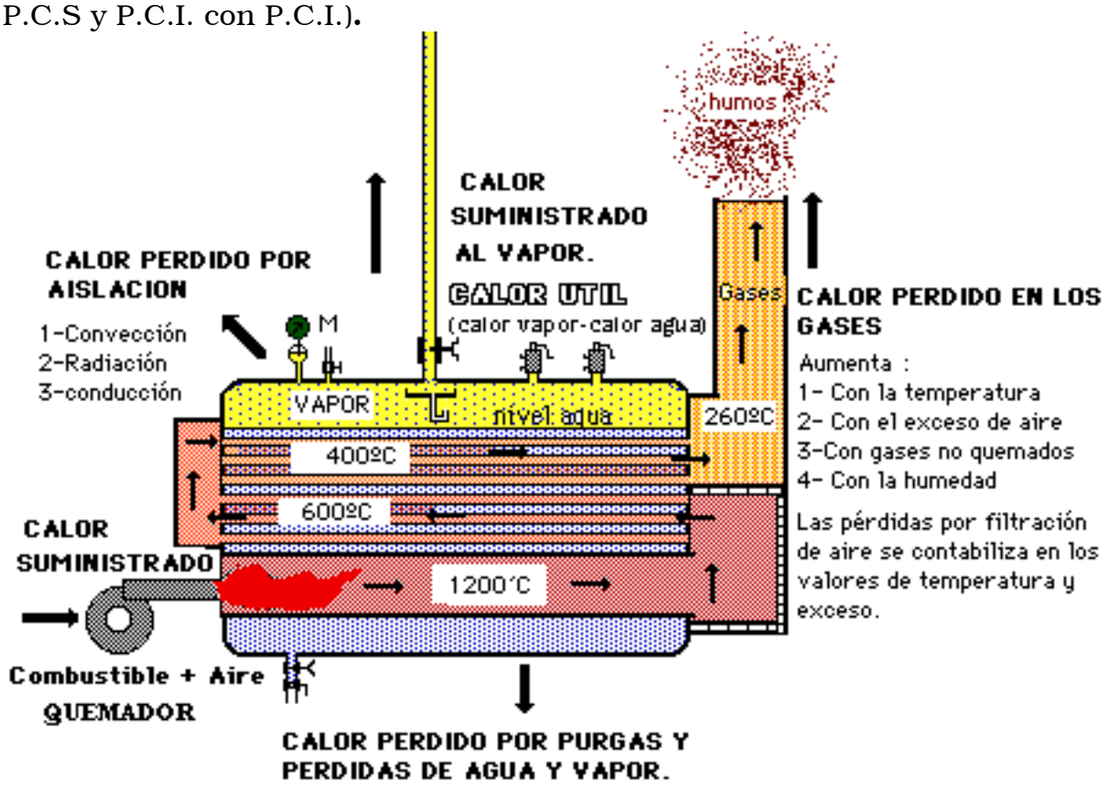
Como vemos en la tabla anterior, si entramos por la vertical “Eficiencias a mejorar” e

interceptamos al entrar con el valor mejorado por “Eficiencias mejoradas”, el cruce de la horizontal con la vertical dará el valor en **%** de **“ahorro del combustible”**, esta tabla se refiere para cualquier combustible, ya que solamente nos estamos refiriendo a %.

Hablando de EFICIENCIAS :

Por lo que veremos, tendremos la **EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN y TRANSFERENCIA** en la primera apreciación del aprovechamiento del calor transferido a la caldera, pero como la caldera tiene una **EFICIENCIA TÉRMICA** propia como equipo térmico (pierde calor por su cuerpo, purgas, pérdidas de agua y vapor, etc), la **EFICIENCIA TOTAL** de la caldera tendrá en consideración esta última, ya que en realidad la **EFICIENCIA TOTAL será realmente la relación del calor transformado en vapor** (menos el calor que trae el agua de alimentación, tomando en ambos la referencia de 0ºC) **al calor entregado por el combustible** (variando la expresión de eficiencia como un porcentaje - %- referido a uno de los poderes caloríficos especificados, poder calorífico **superior o inferior,** si no se define a que poder calorífico se expresa, queda invalidada la expresión de eficiencia o rendimiento).

Por ejemplo en una misma caldera **la EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA tiene dos expresiones** (para una misma medición o condición) : en el caso de F. Oíl pesado la misma EFICIENCIA se puede expresar como 87,98% al **P.C.I.** es equivalente a 83,52% al **P.C.S**., ambas pueden ser usadas para el cálculo o evaluación del ahorro, aunque deberán ser comparadas con los mismos poderes caloríficos establecidos (P.C.S. con P.C.S y P.C.I. con P.C.I.)**.**



Más allá de la caldera, cuya EFICIENCIA está definida en la compra y la operación, la EFICIENCIA del vapor generado, estará en su transporte (aislación, pérdidas de carga, etc)**, su utilización** (pérdidas del equipo: térmicas y mecánicas) **y el retorno de el calor no aprovechado en el equipo o máquina** (condensado y vapor de “flash”, que hace elevar la Eficiencia Total de la planta de generación si se recupera)**, que mejora la producción de vapor respecto al consumo de combustible** (cuanto más caliente sea el agua de alimentación, mayor será la producción de vapor para una misma cantidad de combustible).

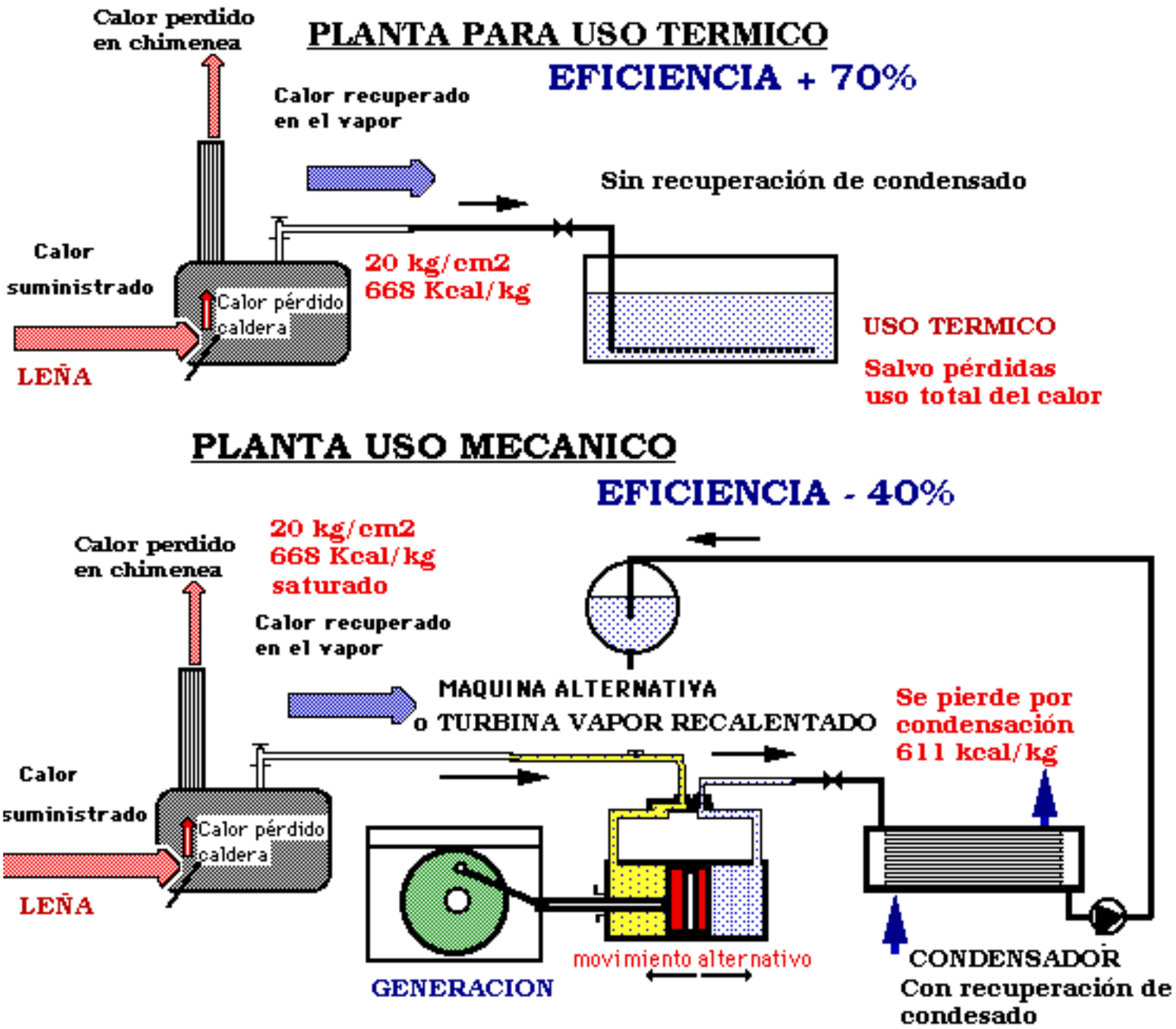
Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

La Eficiencia en una planta procesadora (fábrica) **no es solamente un problema contable**, es la sumatoria del uso eficiente de todas las energías disponibles, tanto las **fisico-químicas** (combustión, electricidad, transmisión, transformación, etc.) como la **humana** (una energía muy compleja si solamente la consideramos desde un punto de vista físico y no tomamos en cuenta el poder de la mente).

Desde una cisterna de baño perdiendo una valiosa agua hasta una lámpara incandescente iluminando la luz solar, son parte de la Eficiencia.

El diseño del sistema de energía (generación de vapor) **es de un valor fundamental para lograr una Eficiencia del sistema, ya que si usamos una caldera en co-generación de electricidad-vapor de escape, veremos que podemos obtener un parcial o total de una energía eléctrica sin perder la Eficiencia de la planta** (es de conocimiento general, que una planta de generación térmica de generación eléctrica a condensación del vapor tiene una Eficiencia que en general que no llega al 30% (ya que en la condensación del vapor para obtener un máximo de generación eléctrica perdemos más del 50% de la energía desarrollada por el combustible, cualquiera sea este, líquidos, gaseosos o de biomasa como la leña), **pero si la generación eléctrica es combinada con el aprovechamiento térmico del vapor de escape, la Eficiencia de la planta puede superar ampliamente el 60%).**

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS



Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

Dentro de las energías perdidas en una planta, podemos hacer una lista, en la que seguro no estaremos indicando el total, alguna quedará disimulada en el bosque :

1-Pérdidas en la combustión y transferencias en calderas (puede ser hasta más de un 30% del combustible). **Pérdida de la caldera como equipo térmico:** pérdidas **térmicas** (propias de la fabricación o sea aislación) o en su **operación** (como el manejo de las aguas, purgas, de los elementos auxiliares, etc.).Pudiendo esta última llegar a valores muy importantes de pérdidas (aunque sea un buen diseño de caldera, en el mal manejo de las aguas, la pérdida puede superar el 15%).

2-Pérdida en la transmisión de la energía térmica, eléctrica o mecánica del fluido entre la máquina de generación (por ejemplo: caldera) y **la máquina o equipo que lo usa** (puede ser también más del 30%). **Una simple cañería mal dimensionada o mal trazada o instalada** (aislación, caídas, etc.) **puede perder parte de le energía** que intentamos transmitir y aprovechar al máximo.

3-Pérdidas en el uso de la energía en la máquina o equipo que la utiliza (puede ser muy alta, desde un equipo de calefacción a una máquina, debido a: desde la trampa de vapor mal elegida o mal instalada, de una bomba hidráulica de mal diseño o mal elegido su uso, desde un motor eléctrico mal elegido o mal acondicionado a la función etc.).

4-Pérdida por mala recuperación de los retornos de energía (en este caso la posibilidad de aprovechar los condensados de vapor, la recuperación de los gases efluentes, el calor disipado por máquinas de compresión, los fluidos efluentes con energía calórica por encima del nivel ambiental, etc.).

5-Pérdidas en energías reactivas (como la eléctrica) **o el nivel de temperatura innecesariamente alto** (caso de trabajar con la presión de la caldera por encima de lo necesario).

6-Pérdidas por los diseños inadecuados (máquinas de bajo rendimiento, aislaciones faltantes o insuficientes, presiones por encima de las necesarias, etc.).

7-Pérdidas por las pérdidas mismas (fluidos que escapan de su conducciones, sea vapor, agua caliente o fría, electricidad a tierra, pérdidas aire en las líneas de aire comprimido, etc.).

9-Pérdidas por falta de conocimiento, organización o motivación (estas responden a la capacidad de los supervisores en saber transmitir sus conocimientos y su **don de mando**).

Como vemos, es una lista interminable, que solamente los técnicos especializados en la ingeniería de cada rama pueden percibir, no así la administración de la empresa muchas veces ocupada en ver gráficas y números.

Pérdidas en la sala de caldera

Las pérdidas en la sala de caldera, la debemos estudiar desde varios puntos: **diseño de la caldera, forma de operación de la caldera, operación de la combustión y sus equipos asociados, la recuperación del calor de los gases de chimenea, la aislación de los elementos con altas temperaturas, utilización de la mejor agua de reposición y recuperación de energía en los condensados.**

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

Diseño de la caldera

El diseño de la caldera es un factor de primera importancia en el aprovechamiento de la energía del combustible. En los combustibles alternativos este diseño realmente juega un papel fundamental, ya que los combustibles alternativos (como la leña en sus distintas formas y humedades, así como los “desechos” agrícolas) **tienen características muy específicas en cada caso** (no todos los hogares pueden quemar las distintos elementos, por ejemplo una caldera para quemar cáscara de arroz es diferente a una caldera para quemar “chips” de madera, ni que hablar de la quema de rolos, etc.). **Si bien “quemar” quema cualquier hogar, el problema es lograr la combustión completa, sin destruir la “parrilla” o el hogar, lograr la generación en lo más Eficiente y no contaminar el ambiente. Lo anterior está sumamente ligado a la Eficiencia de las calderas en su diseño y operación, como veremos a continuación.**

No significa que una caldera actual realmente sea “Eficiente” porque fue diseñada en la actualidad, también en la actualidad se cometen errores, especialmente al buscar bajar los costos de fabricación de las calderas, lo que lleva a eliminar elementos que se necesitan para poder lograr la combustión completa con el mínimo exceso de aire, con la variaciones de la calidad del combustible (especialmente en celulósicos).

En una caldera se mide su comportamiento respecto a la energía en dos formas: en forma **directa** o en forma **indirecta**.

La forma directa es **midiendo el calor transportado por el vapor en forma neta** (midiendo las condiciones del vapor y su flujo, al que debemos restar el calor introducido en el agua de alimentación), **midiendo el combustible** (sus condiciones y su flujo)**, calculando la energía calorífica que libera** , luego **la relación de ambos referidos al Poder Calorífico** (sea el Superior o Inferior) , nos dará el **% de EFICIENCIA TOTAL.**

Trataremos primero el caso de **forma indirecta**, ya que es el que normalmente usaremos, **midiendo los gases de chimenea**, los que nos va a permitir el ajuste y evaluación de la

combustión y del estado de la caldera (además por lo general la medida directa de la EFICIENCIA exige instrumentos que normalmente no se encuentran en la mayoría de las plantas : caudalímetros precisos, tanto de vapor como de combustible).

La forma indirecta de medir la Eficiencia de una caldera se basa en considerar por medio de la medición de los gases de chimenea, l**a pérdida: 1-** por **temperatura**, **2- exceso de aire** y **3-gases no quemados**, luego basados en la **Eficiencia de la caldera como equipo térmico** (dada por el fabricante como un % del calor cuando la caldera está al 100% de su capacidad) y la **consideración de las purgas y pérdidas de agua y vapor**. Con ambas podremos saber la EFICIENCIA TOTAL de la caldera o aprovechamiento global del combustible.

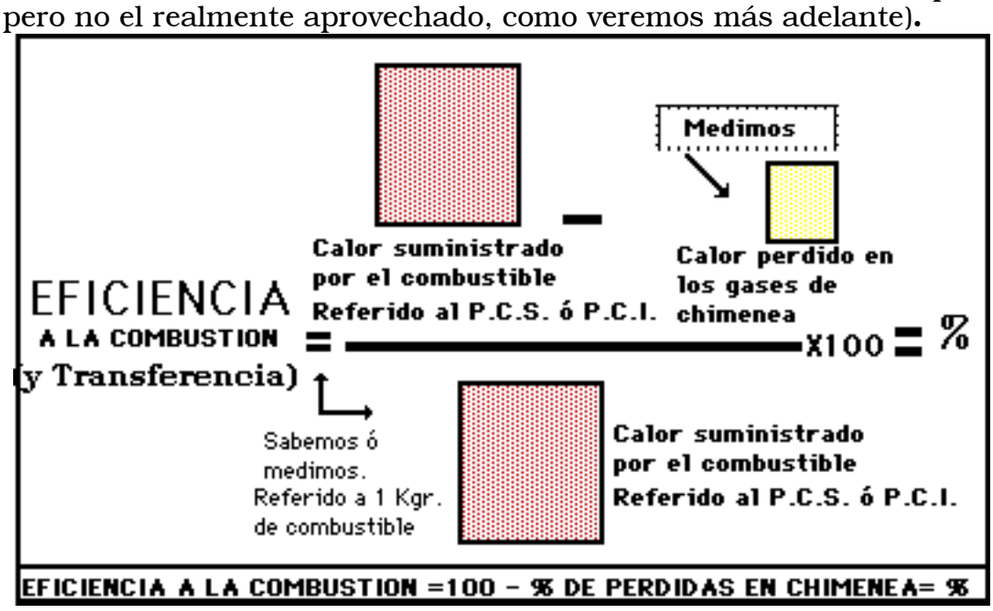
Veamos la definición de ambas:

a- en Eficiencia de Combustión y Transferencia y b- en Eficiencia Total.

a-Eficiencia de Combustión y Transferencia

Esta eficiencia está considerando que parte (%) del **calor total disponible (referido siempre al P.C.I. ó al P.C.S.) es el que queda en la caldera**, ya que **considera las pérdidas de chimenea** (pérdidas de calor por gases no quemados, la pérdida por la temperatura con que salen los gases en la chimenea y la pérdida de calor por exceso de aire que calentamos y expulsamos por la chimenea, sin darnos utilidad).

En otras palabras, podemos decir que mide el calor que ha logrado pasar por el metal y refractarios de la caldera (o visto de otro modo, mide el calor que ha quedado en la caldera, pero no el realmente aprovechado, como veremos más adelante)**.**

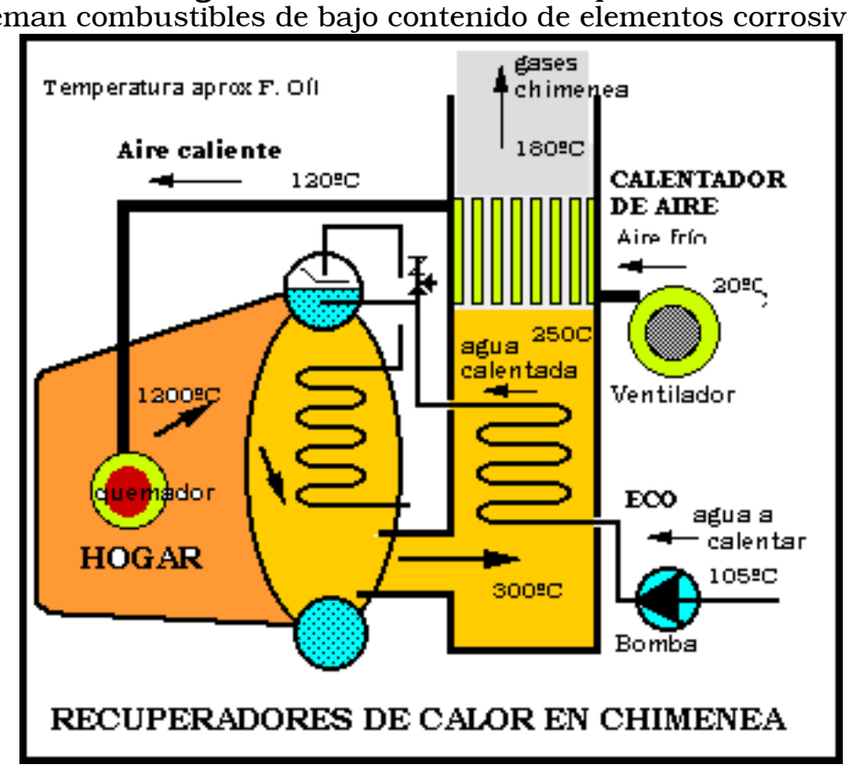

Medimos
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.
Calor perdido en los gases de chimenea
EFICIENCIA A LA COMBUSTION (y Transferencia)
= X100 = %
Sabemos ó medimos. Referido a 1 Kgr. de combustible
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.
EFICIENCIA A LA COMBUSTION =100 - % DE PERDIDAS EN CHIMENEA= %

Es evidente que a **iguales condiciones de combustión**, la transferencia juega el rol más importante y esta, desde el punto de vista práctico significa que a cuanto más baja la temperatura de los gases expulsados por la chimenea de un diseño de caldera, mejor será su **Eficiencia de transferencia. Lo que significa que la Eficiencia de Transferencia está implícitamente unida a la Eficiencia de la Combustión, ya que la temperatura de los gases de salida está ligada al diseño de la caldera.**

Esto nos podría hacer pensar, que por lo general una caldera con menor vaporización por m2. (Kg. de vapor total divido por la superficie total de transferencia de la caldera, por lo general, estos valores van desde 20 Kg./m2 hasta más de 50 Kg./m2), puede que tenga menor temperatura de chimenea, ya que parecería que tuviera una gran superficie de intercambio en relación a la producción de vapor (pero no siempre es así, una caldera mal diseñada o diseñada de esa manera puede tener baja vaporización por m2, puede dejar escapar los gases de chimenea a muy alta temperatura, como ocurre por lo general con las calderas verticales de un solo paso) y **puede haber calderas que “aprovechan” mejor el calor aún con un alto valor de generación por m2. de superficie** (generalmente se dá que cuanto más pases de gases tenga una caldera, **menor será su temperatura de chimenea**, lo que mejora la eficiencia, dependiendo del largo de los pases y la velocidad de los gases). Esto **nos permite**

pensar que si ponemos recuperadores de calor en los gases de chimenea: mejor será el aprovechamiento del calor. **Esto está limitado en cada combustible a los problemas de corrosión y costo de los equipos recuperadores**. Ya que a más baja temperatura, la condensación de la humedad en los gases provoca la disolución de los elementos corrosivos, como el anhídrido sulfuroso y sulfúrico, más otros elementos ácidos de productos propios de una combustión incompleta, formando una solución altamente corrosiva. **Aunque en algunos casos es posible hasta aprovechar el calor latente del vapor de agua** en los gases de chimenea, especialmente cuando el combustible está libre de azufre u otros elementos corrosivos. Pero si utilizamos metales o materiales anti-corrosivos es posible recuperar casi cualquier calor residual de chimenea del combustible que sea, el problema es que sea rentable (muchas veces esto provoca contaminación local, en sus efluentes, que de otra manera la contaminación es atmosférica, que tampoco debe ser admitida al día de hoy).

Los **recuperadores de calor**, sino se aprovecha el calor latente (condensación del vapor que va en los gases) y salen los gases a una temperatura que no afecte la corrosión, **la recuperación de calor o sea el % de recuperación puede representar entre un 4% y hasta quizás un 10% en algunos casos** (con calderas que tienen mala Eficiencia de Transferencia o que queman combustibles de bajo contenido de elementos corrosivos).



Al proveedor de la caldera debemos exigirle que sea claro en referencia a la **Eficiencia de Combustión y Transferencia,** es decir que **nos diga el %** y **a que poder calorífico está referida (P.C.S. ó P.C.I.).** Ya sería muy poco preciso no aclarar a que P.Calorífico esta referida.

Esto debe ser comprobado luego en un ensayo cuando la caldera esté instalada. Para ello debemos de llevar la caldera a su valor máximo de producción de vapor y controlando que haya una combustión completa (sin **gases sin quemar o CO, como máximo de CO 400 ppm**), tomar el exceso de aire en base al CO2 (anhídrido carbónico, que depende del tipo de combustible: Fuel Oíl entre 13% y 14%, gas natural entre 10.5% a11%, leña entre 14% y 16%, aprox.) u O2 (oxígeno, ver gráficas), estando este exceso dentro del normal indicado por el proveedor. **En el caso de Fuel Oíl el Nº de hollín (Bacharach) es muy importante, ya que con un combustible pesado más d Nº3 es inadmisible, siendo lo deseable por debajo del Nº2, ni que hablar con con combustible líquidos “livianos” o gas natural** (que también en algunas circunstancias produce hollín).

Luego con la **temperatura de los gases**, con **el exceso de aire**, la **temperatura ambiente** (humedad relativa si afinamos el cálculo) y la **composición del combustible** (tanto su Poder calorífico Superior -P.C.S.- ó Inferior -P.C.I., la composición nos permite junto a los

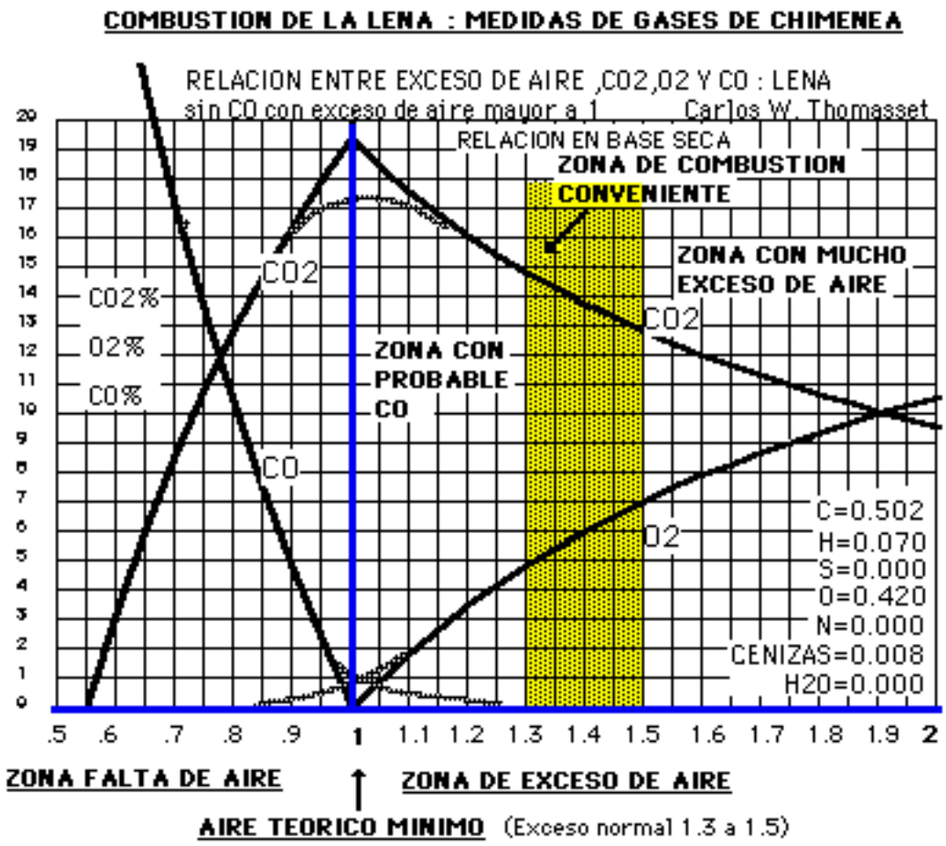
datos atmosféricos, saber el calor específico de los gases de chimenea, que por lo general se puede tomar entre 0,25 a 0,26 Kcal/Kg de gases), y con estos datos hacer el cálculo correspondiente para encontrar la **Eficiencia de Combustión y Transferencia**.

El exceso de aire, lo podemos sacar midiendo el CO2 o el O2, si el instrumento ya trae para cada combustible el cálculo de exceso de aire se podrá utilizar éste (aún el instrumento puede calcular la pérdida en chimenea, ya que mide la temperatura y al poner el combustible utilizado, hace el cálculo de la pérdida o la Eficiencia de Combustión y Transferencia. **Pero no habiendo una idea de la composición aproximada del combustible, es adecuado, medir los 3 elementos fundamentales de composición de los gases de chimenea : CO2%, O2%, CO% y con estos valores hacer el siguiente cálculo que nos dará el exceso de aire sin saber la composición del combustible:**

$$\%(ex.aire)=\frac{(1-CO2-O2-CO)}{(1-CO2-1,5\,CO-((O2-0,5\,CO)/0,21))}$$

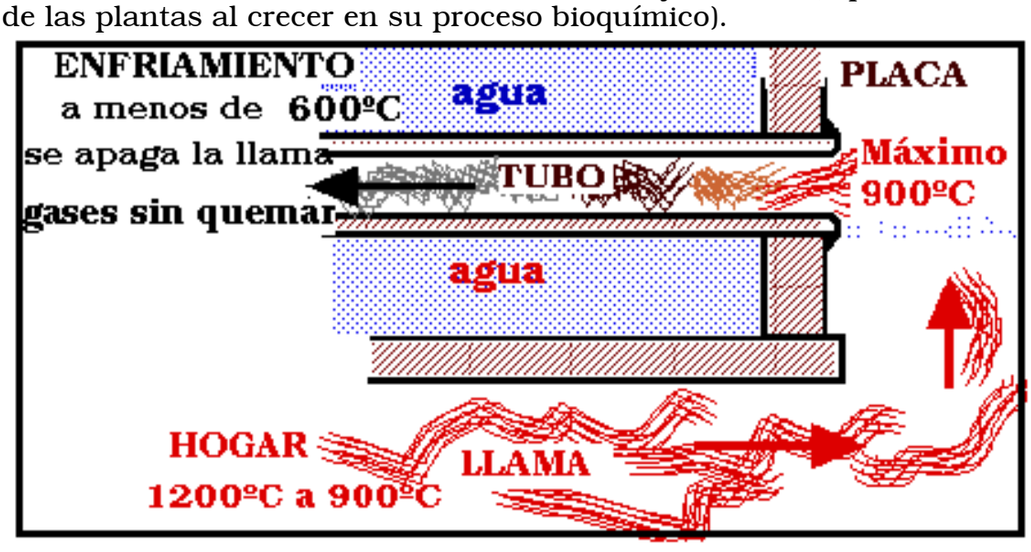
Cuando se tenga la composición del combustible (o se tome como una composición “standard” o sea como Fuel Oíl Pesado, gas natural o celulósicos-como la leña) **se pueden utilizar en forma genérica las gráficas que hemos trazado, lo importante es saber si la medida de los % de CO2 u O2 y CO son en base “seca” o “húmeda”** (salvo el triángulo de OSTWALD y la Tablas de cálculo que hemos publicado, son en base “seca”, que los instrumentos comunes que enfrían los gases miden prácticamente en base “seca”, aunque realmente los que miden en base “seca” son los de absorción (como el Fyrite, el ORSAT, etc.), mientras los que miden en base “húmeda” son los que miden el gas de chimenea a la temperatura de chimenea (como las celdas de zirconio que están introducidas en gas de la chimenea para medir el O2). La gráfica siguiente corresponde a la leña en base “seca”. La vertical central (azul) corresponde cuando no hay exceso de aire (se llama aire mínimo o “estequiométrico” o sea el mínimo necesario teóricamente), hacia la derecha en la base tenemos el exceso de aire (por ejemplo, 1,3 significa que hay un 30% de exceso de aire). De esta gráfica, en la vertical izquierda (ordenadas) podemos leer los valores de CO2% y O2% (suponemos que cuando hay exceso de aire la combustión es completa, cosa que en la realidad muchas veces no lo es). A la izquierda del vertical de “aire teórico mínimo”, se traza la curvas de CO% y CO2%, porque supuestamente no hay exceso de O2, lo cual hace que esta curvas sean teóricas, ya que puede haber O2 que no entró en la combustión y que “aparenta” ser un exceso, pero no lo es (simplemente no llegó a consumirse). Por eso la fórmula anterior calculada utilizando los 3 valores (CO2%, O2% y CO%) es la más exacta para calcular el exceso de aire.

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS



Esta Eficiencia estará **afectada por el exceso de aire, por los gases sin quemar** (CO y otros), por la humedad del aire, y en forma muy importante , por el **hollín o incrustaciones del lado del agua**, ya que “aislan” o dificultan el pasaje del calor del lado del fuego o gases calientes al agua o vapor.

El problema de la combustión completa, en la actualidad (2006) **es un problema, ya que por “abaratar” el costo de construcción de las calderas, las cámaras de combustión están siendo diseñadas con poco material refractario, lo que baja la temperatura de combustión y disminuye la velocidad de combustión, llegando con ello los gases en combustión a zonas muy frías, en donde se apaga la “llama” y con ello quedan “gases sin quemar”** (una pérdida muy importante desde el punto de vista energético y más el problema de contaminación con gases que algunos son tóxicos, otros son contaminantes para el cambio climático (lluvias ácidas, aunque lo que más afecta es el “efecto invernadero” que está más provocado por el CO2 de los combustible fósiles, como los derivados del petróleo, carbón y gas natural, no siendo así con los celulósicos, como la leña y cáscaras, que hacen un ciclo de reutilización de las plantas al crecer en su proceso bioquímico).



Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

Debemos dejar en claro, que todos los combustibles en mayor o menor grado, son contaminantes de una forma u otra (y casi todos tienen la posibilidad, en mayor o menor grado, de ensuciar las superficies de transferencia, aislándolas, lo que provoca que suba la temperatura de chimenea y con ello la pérdida por “gases calientes”, podemos decir con propiedad que hasta el gas natural produce hollín cuando las combustión no es la adecuada por distintas razones).

Hemos querido decir, que cada caldera, de acuerdo al diseño, al tipo de combustible, al % de carga de combustión, a la presión de trabajo en la que se efectúa la medición, tendrá una EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA. Que será máxima cuando se tenga la combustión completa del combustible, el exceso de aire mínimo y sin gases sin quemar, la caldera con buena transferencia: limpia de hollín e incrustaciones, mejorando a medida que baja la presión de trabajo y **a medida que baja % de carga** (dado que baja la temperatura de la chimenea al bajar la carga, lo que dismiye la pérdida en los gases). Pero cuidado, esto es engañoso, ya que si bien **la Eficiencia de Combustión y Transferencia aumenta** en % de carga baja, pero hará bajar la **Eficiencia Total**, ya que al perder la caldera calor al ambiente en forma casi constante, cualquiera sea su carga, debido a que **la pérdida térmica de la caldera es fija de acuerdo a la presión de trabajo** (por la temperatura del agua y el vapor**, y** es muy poco lo que podría aumentar por los “puentes de calor” a la sala de caldera, en las zonas “secas”, como paredes de refractario).

b- en Eficiencia Total.

La Eficiencia Total es aquella que realmente considera el % del calor aprovechado en el vapor o el agua caliente producido por la caldera en referencia al calor total capaz de producir el combustible (referido al P.C.I. o al P.C.S.).

Aquí debemos aclarar, que la Eficiencia Total esta referida, al calor realmente entregado por la caldera, es decir: que si bien la temperatura del agua de alimentación puede afectar dicha Eficiencia en otros parámetros (como los Kg. de vapor/hora), **debemos dejar en claro, que el calor realmente tomado en la caldera es igual al CALOR total del vapor, menos el Calor suministrado en agua de alimentación** (ambos referidos a 0ºC)**.**

Calor Suministrado = Calor vapor - Calor agua alim.

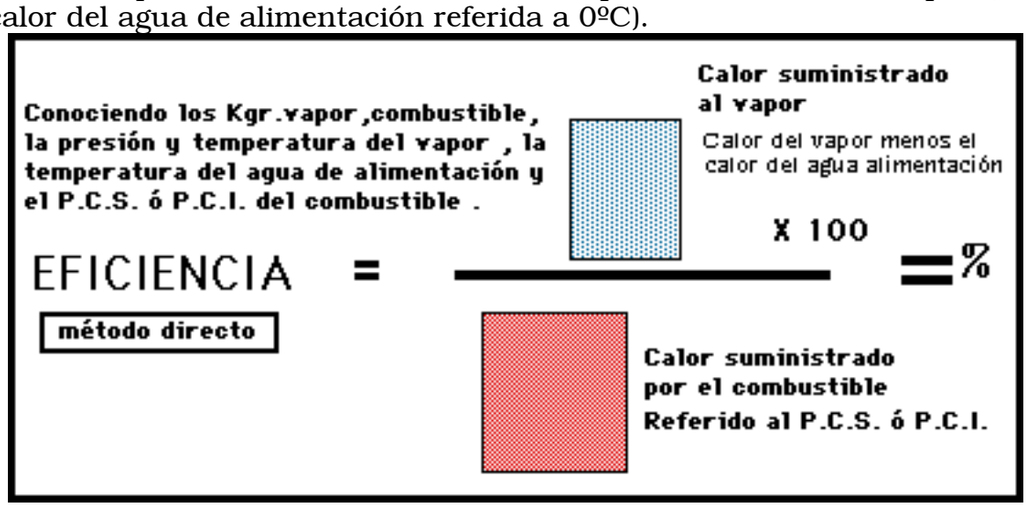
La diferencia entre estas dos Eficiencias (la EFICIENCIA TOTAL respecto a la EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA)**, es el calor perdido en el cuerpo de la caldera a la sala de caldera, sumada a las purgas y pérdidas de agua y vapor.**

Si pensamos en esta diferencia, estamos pensando en la **aislación de la caldera** respecto a la sala de caldera, el **tamaño o dimensión de la caldera** como cuerpo físico o expuesto, a la **calidad del agua de reposición y al % de condensado de retorno** (y su calidad térmica), **quienes definen el % de purga** (la purga continua, de fondo o de niveles : agua caliente a temperatura de vaporización que se tira o se recupera en parte dicho calor con recuperadores).

Es importante que el proveedor suministre el valor de la Eficiencia Total (considerando las purgas a 0%)**, ya que está condenada al diseño de la caldera, cosa que luego no podremos alterar fácilmente, pero sí hacer que se trabaje en el punto óptimo o de máxima EFICIENCIA.** Una caldera con un diseño con mucho refractario al exterior, tendrá muchas pérdidas, ya que el refractario se puede aislar hasta cierto punto, un exceso de aislación puede provocar la “quema” o desgaste del refractario o el metal si la aislación se pretende hacer por fuera del mismo (de aquí que la mejor opción es la utilización de paredes refrigeradas con la propia agua de la caldera, como capillas, doble cámaras, y luego aislar todo lo que se pueda, ya no habrá peligro de excesos de temperatura en la estructura). **Pero cuidado, si la cámara de combustión se enfría demasiado** (hay demasiada transmisión de

calor), **la combustión fría puede provocar una combustión incompleta** (produciendo pérdidas por gases no quemados y contaminación por los mismos a la atmóstera).

Recordar que el calor suministrado al vapor es el calor del vapor (referido a 0ºC menos el calor del agua de alimentación referida a 0ºC).


Conociendo los Kgr.vapor,combustible, la presión y temperatura del vapor , la temperatura del agua de alimentación y el P.C.S. ó P.C.I. del combustible .
Calor suministrado al vapor
Calor del vapor menos el calor del agua alimentación
X 100
EFICIENCIA =
=%
método directo
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.

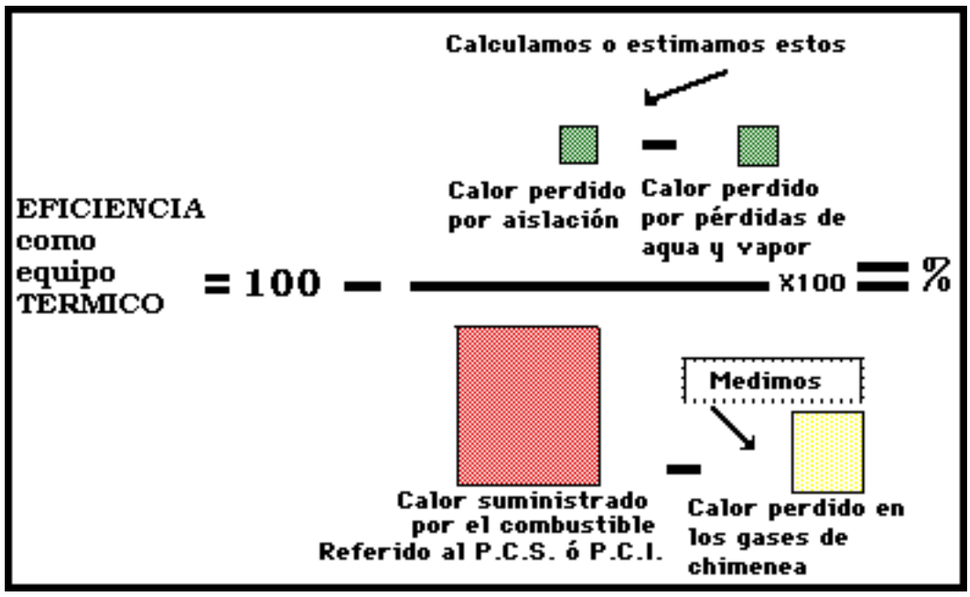
Esta Eficiencia está afectada por todas las que afectan a la Eficiencia de Combustión y Transferencia, además de las nombradas anteriormente, ya que la **EFICIENCIA TOTAL** es el producto de la **EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA x** la **EFICIENCIA de la CALDERA como equipo térmico**. A esta Eficiencia como equipo térmico, la definimos matemáticamente como la relación expresada en %, como :

(EF. Total / EF. Comb. y Trasnf.) x100 = % EFICIENCIA COMO EQUIPO TÉRMICO.

O sea, es la Eficiencia Total divida la Eficiencia de Combustión y Transferencia por 100 y nos dá el % de Eficiencia de la caldera como Equipo Térmico.

Veamos en la siguiente esquema, representado al % de EFICIENCIA TÉRMICA de una caldera. En el **numerador**, **a 100% se le “resta” el % de las pérdidas por la aislación** (calor perdido por radiación, convección y conducción de la aislación y “puentes de calor”, como fondos “secos”, o estructuras metálicas) **más el calor perdido por las purgas y pérdidas de vapor y agua**. En **denominador**, la cantidad de calor que queda en el interior de la caldera (EFICIENCIA de COMBUSTIÓN Y TRANSFERENCIA, o se el calor que nos dá el combustible menos el calor perdido en los gases de chimenea, por exceso de aire, gases sin quemar, agua evaporada, agua sobrecalentada, producto de la humedad del combustible o del agua formada por la combustión del hidrógeno).

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS


Calculamos o estimamos estos
Calor perdido por aislación
Calor perdido por pérdidas de agua y vapor
EFICIENCIA como equipo TERMICO
= 100 −
X100 = %
Medimos
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.
Calor perdido en los gases de chimenea

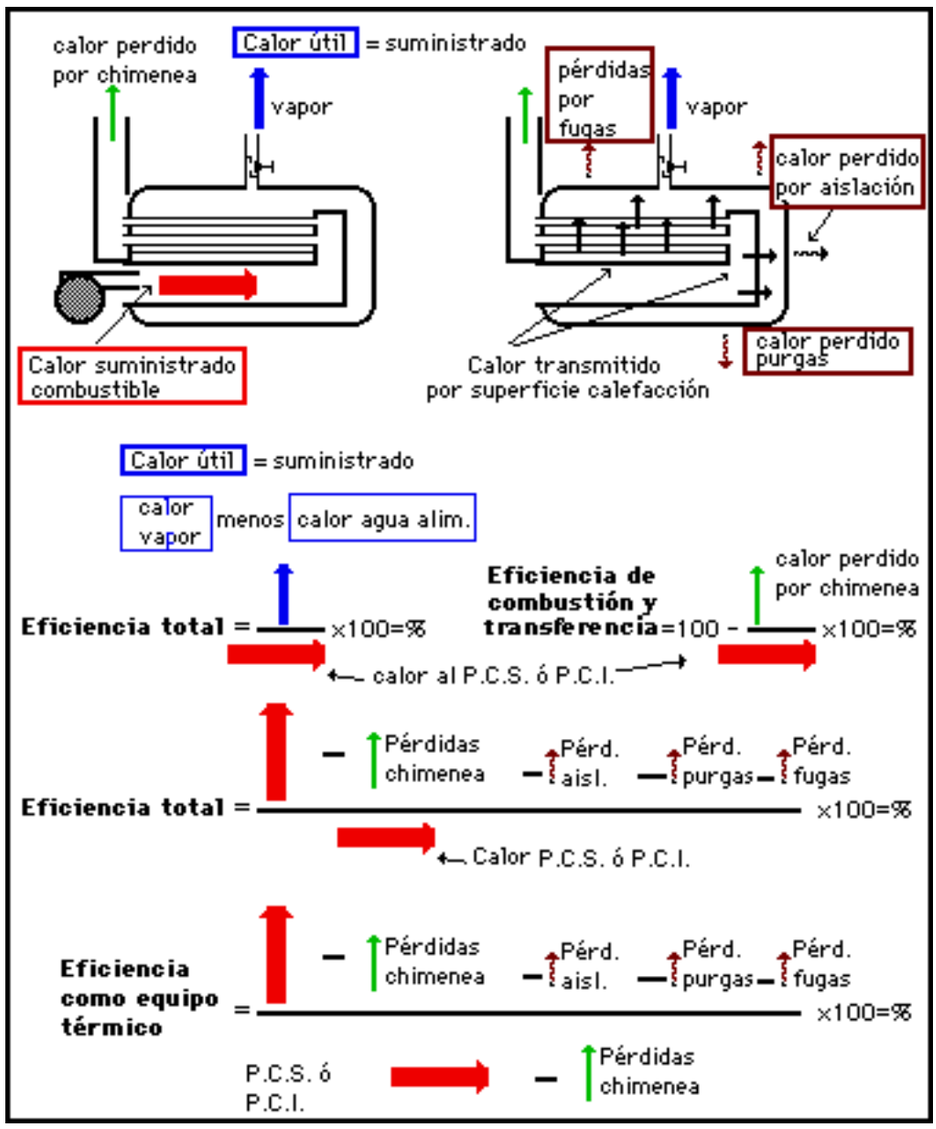
Es el % del calor realmente entregado por la caldera al vapor del calor total recibido por la caldera producido por la combustión descontando la pérdidas por chimenea (o visto de otro modo, es el **% de calor como calor útil** que realmente a **quedado** en la caldera : o sea, este **calor que ha quedado en la caldera**, es el **calor que han recibido las superficies de intercambio del agua y el vapor** (la que luego se irá con el vapor y las que se han ido por las purgas y las pérdidas de agua y vapor, más las pérdidas por aislación, **además** como las que se pierden por zonas de refractarios o puentes térmicos) o de otra manera, **es el % de calor aprovechado del calor total al P.C.S. ó P.C.I. menos el calor perdido por chimenea**.

Debo aclarar que por lo general se dá la **Eficiencia de la caldera como equipo térmico referida al calor total liberado** en la combustión, **cosa que no estoy de acuerdo, por está “atando” la Eficiencia de caldera “como equipo térmico” a la buena o mala combustión** (que varía permanentemente en la operación de la caldera).

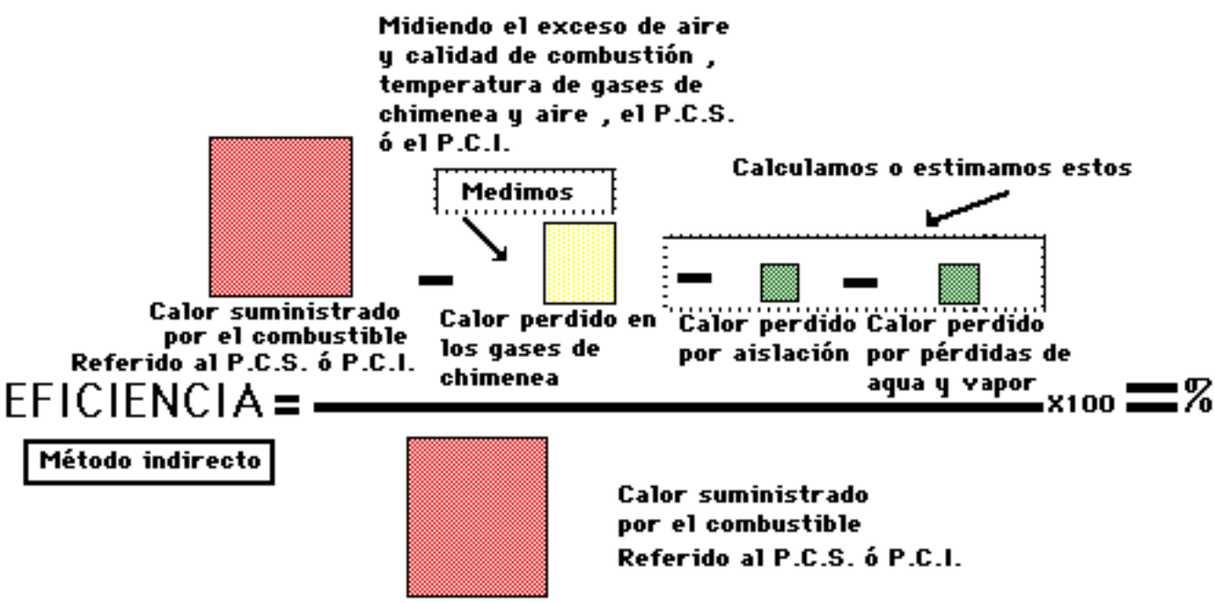
Veamos en forma gráfica estas relaciones, recordando que el **calor útil tomado en la caldera, es igual al calor total del vapor menos el calor suministrado por el agua de alimentación:**

En forma general, estas relaciones que he puesto en forma visual, la llevaremos más adelante en forma matemática, de manera de darle una utilidad real, para la comparación y la optimización del uso Eficiente de la generación del vapor.

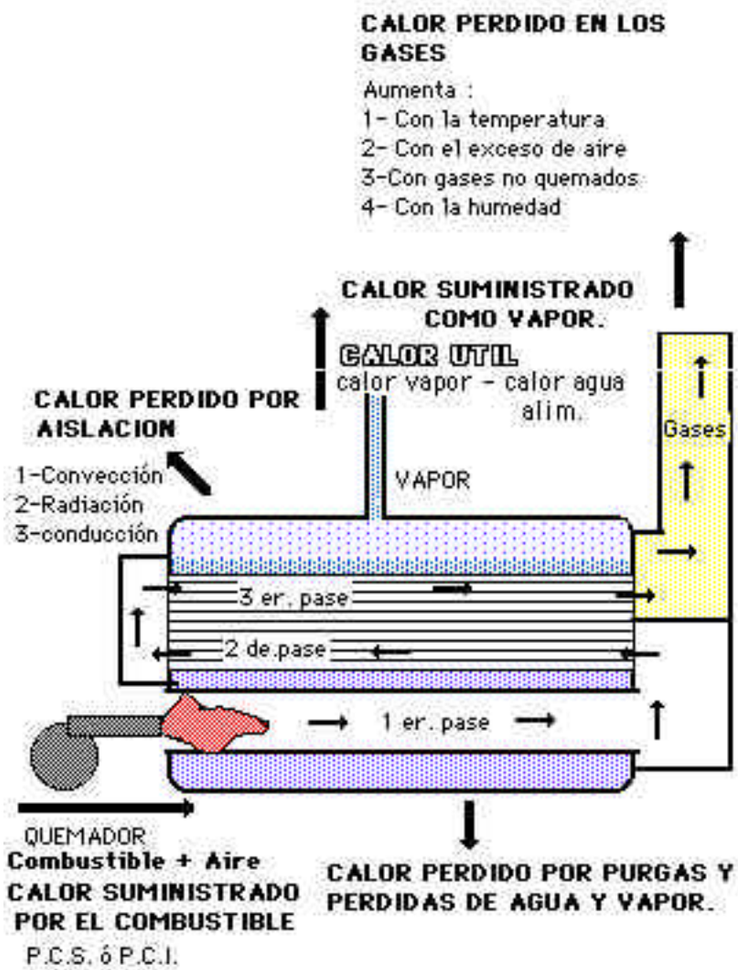
Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS



En la figura siguiente, establecemos los elementos que afectan el comportamiento Eficiente de las calderas, pudiendo luego en cada tema, ajustar los detalles:


Midiendo el exceso de aire y calidad de combustión , temperatura de gases de chimenea y aire , el P.C.S. ó el P.C.I.
Medimos
Calculamos o estimamos estos
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.
Calor perdido en los gases de chimenea
Calor perdido por aislación
Calor perdido por pérdidas de agua y vapor
EFICIENCIA =
X100 = %
Método indirecto
Calor suministrado por el combustible Referido al P.C.S. ó P.C.I.

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS



El **calor útil o calor suministrado** como vapor, es realmente el **calor tomado en la caldera**, es decir, que al **calor del vapor le debemos descontar el calor suministrado en el agua de alimentación** (ambos referidos a0 ºC), por eso, cuando nos referimos a este calor útil o suministrado, **estaremos refiriéndonos a la Eficiencia de la caldera, pero cuando nos estemos refiriendo a todo el calor del vapor** (en la que se ha sumado el calor del agua de alimentación) **nos estaremos refiriendo a la Eficiencia de la producción de vapor** (o Kg. de vapor logrado por Kg. de combustible, por eso en este caso se toma por lo general los Kg. de vapor a 100ºC considerando el agua de alimentación a 100 ºC, de manera de eliminar con un cálculo las diferencias de presiones de vapor y temperaturas en el agua de alimentación).

Debemos prestar mucha atención cuando nos referimos a las EFICIENCIAS a que poder calorífico nos estamos refiriendo:

Cuando nos referimos al **P.C.S**. (**Poder Calorífico Superior**, estamos considerando el calor suministrado por 1 Kg. de combustible en la cual se ha considerado la combustión completa y **referida a 0º C** y que el **calor de vaporización** del agua que trae el combustible y la que se forma (se forma de agua-**H2O**-, **9 veces** el peso del hidrógeno -**H**- que contiene el combustible) , han entregado su **calor latente de vaporización, que en la práctica los tomaremos como 600 Kcal/Kg -** Kilocaloría por kilogramo, recordar que 1 Kcal. es igual **al calor necesario para elevar 1ºC a 1 Kg. de agua,** tomada en el entorno de 14,5ºC a 15,5ºC, ya que la misma varía un poco al variar la temperatura, también se podría considerar en trabajar utilizando medidas inglesas como el **B.T.U.**, ver tablas al final).

Cuando nos referimos la **P.C.I** (**Poder Calorífico Inferior**, estamos considerando el mismo calor anterior **menos el calor latente de vaporización del agua que viene el combustible y la que se forma por la combustión del hidrógeno del combustible**, generalmente la diferencia se toma como la cantidad de agua formada y traída por 1 Kg. de combustible por 600 Kcal/Kg., en una palabra:

Modulo 2-HABLANDO DE EFICIENCIAS

P.C.I. = P.C.S. - H2O (agua) **x 600 Kcal/Kg.**

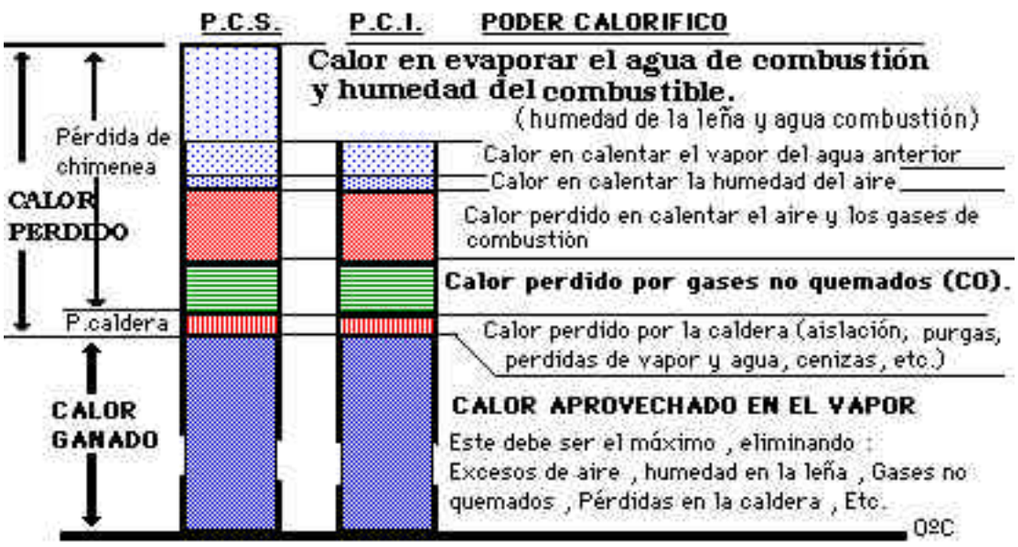
Como estos dos Poderes caloríficos son numéricamente distintos (a pesar de indicar lo mismo o sea el poder calorífico de un mismo combustible), como el **P.C.S.** es **numéricamente** mayor que el **P.C.I.**, cuando para una caldera hagamos el cálculo utilizando los dos poderes caloríficos, veremos que el referido al **P.C.S.** dará un % menor que el referido al **P.C.I.**, aunque si consideramos a que poder calorífico están referidos, significan lo mismo (no así si **no** sabemos al % a que poder calorífico está referido, **ya que siempre se deben comparar la Eficiencias referidas a los mismos P.C.**). Esta diferencia aumenta en la medida que los combustible contienen **más hidrógeno** como en los combustibles más livianos o gases o como el caso de la leña que trae ya el agua formada como humedad.

Podemos considerar en forma general que las EFICIENCIAS referidas al P.C.S. representan más el comportamiento de los combustibles que de la propia caldera.

La EFICIENCIAS referidas al P.C.I. resultan más adecuadas al comportamiento de la caldera y no tanto al combustible (cuando tiene o forma agua al quemar el hidrógeno).

Por lo general en Uruguay, utilizaremos las **EFICIENCIAS** referidas al **P.C.I.** (casi en muy pocos paises se usa referidas la P.C.S., como puede ser en U.S.A.).

Veamos en forma gráfica como visualizar los Poderes caloríficos de un mismo combustible y como al referirnos a su relación con las EFICIENCIAS, vemos que la diferencia está en el calor que en la práctica realmente se puede aprovechar. Es decir, cuando nos referimos a las EFICIENCIAS referidas al **P.C.I.** estamos estamos descontando que no podremos aprovechar el calor latente del agua formada en la combustión del hidrógeno y el agua vaporizada de la humedad del combustible, **ya que se supone que las calderas por lo general no tienen un sistema de recuperación de este calor latente** (pero los tiempos modernos nos están dando ya calderas que en determinados combustibles este calor se puede recuperar, lo cual si nos referimos su EFICIENCIA al P.C.I. dará un % superior a 100% de EFICIENCIA, lo cual no parece correcto).


P.C.S.
P.C.I.
PODER CALORIFICO
Calor en evaporar el agua de combustión y humedad del combustible.
(humedad de la leña y agua combustión)
Pérdida de chimenea
CALOR PERDIDO
Calor en calentar el vapor del agua anterior
Calor en calentar la humedad del aire
Calor perdido en calentar el aire y los gases de combustión
Calor perdido por gases no quemados (CO).
P.caldera
Calor perdido por la caldera (aislación, purgas, perdidas de vapor y agua, cenizas, etc.)
CALOR GANADO
CALOR APROVECHADO EN EL VAPOR
Este debe ser el máximo , eliminando :
Excesos de aire , humedad en la leña , Gases no quemados , Pérdidas en la caldera , Etc.
0ºC

Observando la figura anterior, nos permite visualizar el porqué las EFICIENCIAS referidas al **P.C.S. numéricamente son menores que las referidas al P.C.I., pero que ambas si tenemos en cuenta a qué poder calorífico están referidas, indican lo mismo** (pero si mezclamos Eficiencias referidas una al P.C.S. y otra al P.C.I. , realmente cometemos un gran error).

Establecidos los parámatros básicos para entender la EFICIENCIA, pasemos a los temas que nos obliga la ruta trazada: modulo 3 en adelante.